

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 06-112763

(43)Date of publication of application : 22.04.1994

(51)Int.Cl.

H03H 9/25

(21)Application number : 05-042642

(71)Applicant : JAPAN ENERGY CORP

(22)Date of filing : 03.03.1993

(72)Inventor : SATO TAKAHIRO  
ABE SHUSUKE

(30)Priority

Priority number : 04 88409

Priority date : 13.03.1992

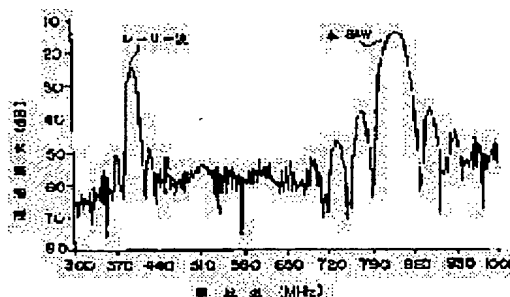
Priority country : JP

## (54) SURFACE ACOUSTIC WAVE DEVICE

## (57)Abstract:

PURPOSE: To provide a surface acoustic wave device which has a signal processing subject frequency of 1GHz or more and utilizes a surface wave of a high transmitting speed and the small transmission loss by means of a single crystal substrate of lithium tetraborate.

CONSTITUTION: A surface acoustic wave device contains a piezoelectric substrate consisting of a lithium tetraborate single crystal and an electrode which is formed on the surface of the piezoelectric substrate to excite, receive, reflect and transmit the surface acoustic waves. The electrode is formed so that the cutting angle of the substrate surface and the wave transmitting direction are set at  $0^\circ - 45^\circ$ ,  $30^\circ - 90^\circ$  and  $40^\circ - 90^\circ$  in terms of the Euler angle display or within their equivalent ranges. The surface acoustic wave has a speed higher than a Rayleigh wave and a leaky wave. Furthermore the energy of the surface acoustic wave is partly radiated within the piezoelectric substrate in its transmission state.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 06.11.1995

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 25.01.2000

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3244094



[Date of registration] 26.10.2001  
[Number of appeal against examiner's decision of rejection] 2000-02397  
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection] 24.02.2000  
[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office



[JP,06-112763,A]

\* NOTICES \*

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.

3.In the drawings, any words are not translated.

---

CLAIMS

---

[Claim(s)]

[Claim 1] The piezo-electric substrate which consists of a tetraboric acid lithium single crystal The electrode for being formed in the front face of the aforementioned piezo-electric substrate, exciting and receiving it, reflecting it and spreading a surface acoustic wave It is more than the speed of the quick traverse wave of the bulk wave which it is surface-acoustic-wave equipment equipped with the above, and the logging angle of the front face of the aforementioned piezo-electric substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave are Eulerian-angle displays (0 degree - 45 degrees, 30 degrees - 90 degrees, 40 degrees - 90 degrees), and the aforementioned electrode is formed so that it may become within limits equivalent to it, and the speed of the aforementioned surface acoustic wave spreads in the same direction, and is characterized by not exceeding speed

[Claim 2] The piezo-electric substrate which consists of a tetraboric acid lithium single crystal The electrode for being formed in the front face of the aforementioned piezo-electric substrate, exciting and receiving it, reflecting it and spreading a surface acoustic wave It is surface-acoustic-wave equipment equipped with the above, and the logging angle of the front face of the aforementioned piezo-electric substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave are Eulerian-angle displays (0 degree - 45 degrees, 38 degrees - 55 degrees, 80 degrees - 90 degrees), and it is characterized by forming the aforementioned electrode so that it may become within limits equivalent to it.

[Claim 3] Surface-acoustic-wave equipment which the logging angle of the front face of the aforementioned piezo-electric substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave are Eulerian-angle displays (0 degree - 45 degrees, 45 degrees - 50 degrees, 80 degrees - 90 degrees), and is characterized by forming the aforementioned electrode so that it may become within limits equivalent to it in surface-acoustic-wave equipment according to claim 1 or 2.

[Claim 4] Surface-acoustic-wave equipment which the logging angle of the front face of the aforementioned piezo-electric substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave are Eulerian-angle displays (0 degree - 2 degrees, 45 degrees - 50 degrees, 88 degrees - 90 degrees), and is characterized by forming the aforementioned electrode so that it may become within limits equivalent to it in surface-acoustic-wave equipment according to claim 3.

[Claim 5] Surface-acoustic-wave equipment which is formed with the metal with which the aforementioned electrode makes aluminum a principal component in surface-acoustic-wave equipment according to claim 1 to 4, and is characterized by the standardization thickness of the aforementioned electrode being about 5% or less.

---

[Translation done.]

\* NOTICES \*

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.

3. In the drawings, any words are not translated.

---

DETAILED DESCRIPTION

---

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Industrial Application] this invention is a tetraboric acid lithium single crystal (Li two B4O7). It is related with the used surface-acoustic-wave equipment.

[0002]

[Description of the Prior Art] Surface-acoustic-wave equipment is changing an electrical signal into a surface wave, is a circuit element which performs signal processing, and is used for a filter, a resonator, the delay line, etc. Usually, conversion and inverse transformation from an electrical signal to a surface wave are performed by preparing the metal electrode called tandem-type electrode (IDT, blind-like electrode) on an elastic body substrate (piezo-electric substrate) with piezoelectric.

[0003] As a surface acoustic wave, the Rayleigh wave is mainly used. A Rayleigh wave is a surface wave which spreads the front face of an elastic body, and it is spread without a theory top propagation loss, without diffusing the energy into a piezo-electric substrate. Crystal, the lithium tantalate (LiTaO3), etc. are known as a substrate material used for the surface-acoustic-wave equipment using the Rayleigh wave. Although crystal is excellent in temperature stability, it is lacking in piezoelectric. On the contrary, although a lithium tantalate is excellent in piezoelectric, it is inferior in temperature stability. Using the surface acoustic wave (disclosure surface acoustic wave) spread while diffusing energy in the depth direction of another side where it considers as the material which fulfills both these properties, and the tetraboric acid lithium single crystal attracts attention (see JP,2-44169,B and JP,63-40044,B), and the elastic body called Leakey wave as a surface acoustic wave in recent years is examined. Generally, although the propagation loss by diffusion cannot use the Leakey wave for surface-acoustic-wave equipment greatly, since there are comparatively few propagation losses, it can use in a special logging angle and the propagation direction. For example, the surface-acoustic-wave equipment using the lithium tantalate of 36-degree Y-X cut from which the speed of about 4200 m/sec is obtained is known.

[0004] A Rayleigh wave and the Leakey wave from the relational expression explained below The property it is calculable (it Campbell(s) J. -- J. --) W. R. Jones and "A Method for Estimating Optimal Crystal Cuts and Propagation Directions for Excitation of Piezoelectric Surface Waves" and IEEE transaction on Sonics and Ultrasonics, vol. SU-15, No.4, and pp.209-217, (1968); T.C. Lim and G.W. Farnell, "Character of Pseudo Surface Waves on Anisotropic Crystals", The Journal of Acoustical Society of America, vol.45, no.4, and pp.845-851 (1968),

[0005] Generally, the propagation property of the surface acoustic wave which spreads a piezo-electric substrate front face can be searched for by solving the charge equation which carried out semi-static approximation of the equation of motion and Maxwell's equations under a certain boundary condition. The equation of motion and a charge equation are shown below.

[0006]

[Equation 1]

$$C_{ijkl} U_{k,li} + e_{kij} \phi_{,ki} = \rho \ddot{U}_j \quad \dots (1)$$

[0007]

[Equation 2]

$$e_{ikl} U_{k,li} - \epsilon_{ik} \phi_{,ki} = 0 \quad \dots (2)$$

However, for  $c_{ijkl}$  ( $2 i, j, k, l = 1, 3$ ), the tensor of an elastic coefficient and  $e_{kij}$  ( $2 i, j, k = 1, 3$ ) are [ the tensor of a dielectric constant and  $\rho$  of the tensor of a piezoelectric constant and  $\epsilon_{ik}$  ( $2 i, k = 1, 3$ ) ] densities.  $U_i$  The variation rate of each direction (let a direction perpendicular to the propagation direction  $X_1$  of the surface acoustic wave which  $X_1$  is contained in the propagation direction of a surface acoustic wave, and is contained on a piezo-electric substrate front face in  $X_2$ , and  $X_3$  be directions perpendicular to  $X_1$  and  $X_2$ ) in the system of coordinates shown in drawing 1 is shown, and  $\phi$  shows

electrostatic potential and is shown by the following formula, respectively.

[0008]

[Equation 3]

$$U_i = \beta_i \cdot e^{j\kappa(\alpha x_3 + x_1 - vt)} \quad \dots (3)$$

[0009]

[Equation 4]

$$\Phi = \beta_4 \cdot e^{j\kappa(\alpha x_3 + x_1 - vt)} \quad \dots (4)$$

However, alpha is x3. The attenuation coefficient of a direction, and beta1 An amplitude constant and kappa are [ time and v of the wave number and t ] phase velocity. First, the procedure of calculation of a Rayleigh wave is explained. the phase velocity v of the real number -- assuming -- the above -- variation rate Ui the shown formula (3) and the formula (4) showing the electrostatic potential phi -- the equation of motion (1) and an electric-flux-density equation of continuity (2) -- substituting -- amplitude constant betai \*\*\*\*\* -- arrangement obtains the 8th equation of the attenuation coefficient alpha which makes the real number a coefficient As for an attenuation coefficient alpha, the solution to is acquired by solving this 8th equation.

[0010] Since a wave amplitude must decrease to the depth direction of a substrate in order to be a surface wave, an attenuation coefficient alpha will choose the solution (Im(alpha (n)) < 0, n= 1, and [2, 3, 4]) whose imaginary part is negative. It corresponds to each selected attenuation coefficient alpha, and is four amplitude constant beta1 -beta4. It is computed. By referring to this corresponding amplitude constant betai, four attenuation coefficients alpha are x1. The longitudinal-wave component and x2 which make the variation rate of a direction a principal component A direction or x3 It turns out that it deals with two kinds of traverse-wave components which make the variation rate of a direction a principal component, and the electromagnetic wave component which makes electrostatic potential a principal component, respectively. Since the component of these four surface acoustic waves can be spread, the variation rate Ui of each direction of a surface acoustic wave and the electrostatic potential phi which can be spread can be expressed with the linear combination in the four modes like the following formula, respectively.

[0011]

[Equation 5]

$$U_i = \sum_{n=1}^4 A^{(n)} \cdot \beta_i^{(n)} \cdot e^{j\kappa(\alpha^{(n)}x_3 + x_1 - vt)} \quad \dots (5)$$

[0012]

[Equation 6]

$$\Phi = \sum_{n=1}^4 A^{(n)} \cdot \beta_4^{(n)} \cdot e^{j\kappa(\alpha^{(n)}x_3 + x_1 - vt)} \quad \dots (6)$$

However, A (n) The gain in each mode is shown. Next, the propagation property of a surface acoustic wave is dispelled by giving boundary condition to the above-mentioned formula (5) and (6). In boundary condition [x3 =0 as boundary condition, it is shown that the stress on the front face of an elastic body is zero -- mechanical -- T13=T23=T33=0] and the piezo-electric substrate front face are opened wide -- x3 [ namely, ] of the electric flux density in a front face In boundary condition [x3 =0 a direction component calls it zero -- electric -- In D3 =0] and boundary condition [x3 =0 that the potential in a front face is zero in a surface short circuit, it is phi=0]. By asking for the phase velocity v with which are satisfied of these boundary condition, the propagation property of the surface acoustic wave called Rayleigh wave can be dispelled.

[0013] Next, the computational procedure of the Leakey wave is explained. In calculation of an above-mentioned Rayleigh wave, in case the above-mentioned formula (3) and (4) are substituted for a formula (1) and (2) and it asks for an attenuation coefficient alpha, a bird clapper is in the real number, without the solution of an attenuation coefficient alpha serving as a complex conjugate with the value of

the phase velocity  $v$  to assume. For example, when the phase velocity  $v$  quicker than a Rayleigh wave is assumed, the imaginary part of the attenuation coefficient  $\alpha$  corresponding to one traverse-wave component (henceforth "the 1st traverse-wave component") serves as zero (namely, real root), and the component which is not decreased to the depth direction of a piezo-electric substrate exists. Therefore, the energy of a surface acoustic wave produces a propagation loss in order not to concentrate on a substrate front face completely but to diffuse energy in the depth direction of a piezo-electric substrate.

[0014] In this case, if phase velocity  $v$  is computed as complex as expression on the number of a propagation loss, the coefficient of the 8th equation for asking for an attenuation coefficient  $\alpha$  will also turn into complex. It corresponds to three components other than the 1st traverse-wave component, and three solutions in which an amplitude decreases to the depth direction of a substrate are chosen from eight solutions of this attenuation coefficient  $\alpha$ . Furthermore, the propagation property of a surface acoustic wave is dispelled by corresponding to the 1st traverse-wave component, choosing the solution in which an amplitude increases to the depth direction of a substrate as other one solution, and giving the boundary condition mentioned above to the above-mentioned formula (5) and (6). Thus, generally the solved surface acoustic wave is called Leakey wave (disclosure surface acoustic wave).

[0015]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] However, in the surface-acoustic-wave equipment which used the tetraboric acid lithium single crystal for substrate material, the velocity of propagation of a Rayleigh wave was comparatively slow, and since the Leakey wave of a propagation loss low enough was not found out, either, it was difficult [ it ] to make object frequency of the signal processing high.

[0016] That is, the electrode width of face and the electrode spacing of a tandem-type electrode (IDT) are usually set as the quadrant ( $\lambda/4$ ) of the wavelength of the surface acoustic wave corresponding to the target signal frequency. The velocity of propagation of the Rayleigh wave on a tetraboric acid lithium single crystal is about 3400 m/sec, and in order to be aimed at signal frequency 1GHz or more, electrode width of face and an electrode spacing 1 micrometer or less are needed. Therefore, the manufacture yield of a tandem-type electrode falls and manufacture of surface-acoustic-wave equipment becomes it is remarkable and difficult.

[0017] Since surface-acoustic-wave equipment [ as / whose object frequency of signal processing is 1GHz or more ] is put in practical use, the purpose of this invention is to offer the surface-acoustic-wave equipment with which a tetraboric acid lithium single crystal substrate is used, and velocity of propagation uses a surface wave with few propagation losses quickly.

[0018]

[Means for Solving the Problem and its Function] In the surface-acoustic-wave equipment which has an electrode for the surface-acoustic-wave equipment by the 1st this invention being formed in the front face of the piezo-electric substrate which consists of a tetraboric acid lithium single crystal, and a piezo-electric substrate, and exciting and receiving it, reflecting it and spreading a surface acoustic wave The logging angle of the front face of a piezo-electric substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave are an Eulerian-angle display (0 degree - 45 degrees). It is more than the speed of the quick traverse wave of the bulk wave which an electrode is formed so that it may become within limits equivalent to 30 degrees - 90 degrees, 40 degrees - 90 degrees, and it, and the speed of a surface acoustic wave spreads in the same direction, and is characterized by not exceeding speed of a longitudinal wave.

[0019] Moreover, the surface-acoustic-wave equipment by the 2nd this invention In the surface-acoustic-wave equipment which has an electrode for being formed in the front face of the piezo-electric substrate which consists of a tetraboric acid lithium single crystal, and a piezo-electric substrate, exciting and receiving it, reflecting it and spreading a surface acoustic wave The logging angle of the front face of a piezo-electric substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave are Eulerian-angle displays (0 degree - 45 degrees, 38 degrees - 55 degrees, 80 degrees - 90 degrees), and it is characterized by forming the electrode so that it may become within limits equivalent to it. In this case, as a substrate logging side which is a front face of a piezo-electric substrate, (011), (345), (255), (231), (356), (112), (123), (233), (134), (122), (234), (023), (145), (156), (165), etc. can be used (347).

[0020] Furthermore, the logging angle of the front face of a piezo-electric substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave are Eulerian-angle displays (0 degree - 45 degrees, 45 degrees - 50 degrees, 80 degrees - 90 degrees), and it is desirable to form the electrode within limits equivalent to it. Moreover, as a substrate logging side, it is desirable to use (011), (345), (255), (231), etc. (356). It is desirable to be within the limits which can use a field as a substrate logging side (011) especially, i.e., an Eulerian-angle display, (0 degree - 2 degrees, 45 degrees - 50 degrees, 88 degrees - 90 degrees), and to form the electrode within limits equivalent to it.

[0021] It is formed with the metal with which an electrode makes aluminum a principal component further again, and it is desirable for the thickness of an electrode to be about 5% or less of



surface-acoustic-wave wavelength. When the logging angle of a substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave were set as the specific range, invention-in-this-application persons predicted that the surface acoustic wave (book SAW) which spreads the front face of a piezo-electric substrate existed, emitting two kinds of traverse-wave components to the interior of a piezo-electric substrate as a bulk wave by making a longitudinal-wave component into a principal component, and checked by the simulation.

[0022] When Book SAW develops the theory of the Leakey wave further and the phase velocity  $v$  of the real number quicker than the Leakey wave is assumed, both the imaginary part of the attenuation coefficient corresponding to two kinds of traverse-wave components serves as zero (namely, both real root), and two kinds of components which are not decreased in the depth direction of a piezo-electric substrate exist. The formula (3) mentioned above and (4) are substituted for the simulation of Book SAW a formula (1) and (2). In case it asks for an attenuation coefficient  $\alpha$  from the phase velocity  $v$  extended to complex, it corresponds to two kinds of traverse-wave components (the 1st traverse-wave component and 2nd traverse-wave component). The solution in which an amplitude increases to the depth direction of a substrate was chosen, respectively, it corresponded to the longitudinal-wave component and the electromagnetic wave component as other two attenuation coefficients  $\alpha$ , and the solution in which an amplitude decreases to the depth direction of a substrate was chosen. That is, Book SAW is a surface acoustic wave which spreads a front face, emitting energy to the interior of a substrate by making two kinds of traverse-wave components into a bulk wave.

[0023] Thus, the phase velocity  $v$  for which it asked to  $x_1$  It asked for the phase velocity  $v_p$  of a direction, the electromechanical coupling coefficient  $k_2$ , the propagation loss  $L$ , and the frequency temperature coefficient TCF. These phase velocity  $v_p$ , an electromechanical coupling coefficient  $k_2$ , a propagation loss  $L$ , and the frequency temperature coefficient TCF are shown in the following formula.

[0024]

[Equation 7]

$$V_p = \frac{1}{\text{Re}(1/v)}$$

[0025]

[Equation 8]

$$k^2 = 2 \frac{(v_{po} - v_{ps})}{V_{po}}$$

[0026]

[Equation 9]

$$L = 2 \pi \times 8.686 \times \frac{\text{Im}(v)}{\text{Re}(v)} \quad \left[ \text{dB} / \lambda \right]$$

[0027]

[Equation 10]

$$\text{TCF} = \frac{1}{v_p} \frac{\partial v_p}{\partial T} - \alpha$$

Here, for  $v_{po}$  and  $v_{ps}$ , a front face is  $x_1$  of electric opening and an electric short circuit, respectively. The phase velocity of a direction and  $\alpha$  are  $x_1$ . It is the coefficient of thermal expansion of a direction. The simulation was performed for the purpose of calculating the surface-acoustic-wave property when changing the logging angle and the propagation direction of a tetraboric acid lithium single crystal substrate. The arbitrary propagation properties of a logging angle and the propagation direction are searched for by calculating to the elastic coefficient changed by the Eulerian angle ( $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ), a piezoelectric constant, and a dielectric constant. Moreover, the phase velocity of the bulk wave (a longitudinal wave, a quick traverse wave, late traverse wave) spread to the same direction was calculated. [0028] Here, an Eulerian-angle display ( $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ) is explained using [drawing 31](#). It is  $X_1$  like the system of coordinates shown in [drawing 1](#). The propagation direction of a surface acoustic wave, and  $X_2$  The propagation direction  $X_1$  of the surface acoustic wave contained on a piezo-electric substrate front face A perpendicular direction and  $X_3$   $X_1$  And  $X_2$  It considers as a perpendicular direction.  $X_1$   $X_2$  And  $X_3$  When it is  $X$ ,  $Y$ , and  $Z$  (or  $a$ ,  $b$ , and  $c$ ) of a crystallographic axis, respectively, it considers as the Eulerian

angle (0 degree, 0 degree, 0 degree) of criteria. It is X3 first. It is the propagation direction X1 of a surface acoustic wave centering on a shaft. X1 which only phi made it rotate in the direction of Y, and next rotated from X It is X3 [ perpendicular to a substrate front face ] centering on a shaft. Only theta makes a counterclockwise rotation rotate a shaft from the Z-axis. And X3 which made it rotate It is the propagation direction X1 in the substrate front face centering on a shaft. The direction (the propagation direction of a surface acoustic wave including the logging angle (cut side) of a substrate) where only psi is again obtained by rotating counterclockwise is expressed as an Eulerian angle (phi, theta, psi).

[0029] Next, a simulation result is explained using drawing 2 or drawing 22. Drawing 2 or drawing 4 is in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face the phase velocity  $v_p$  of the surface acoustic wave at the time of making the propagation direction of a surface acoustic wave into (0 degree, theta, 90 degrees) by Eulerian-angle display, and changing an angle theta, an electromechanical coupling coefficient  $k_2$ , and as a result of [ of the propagation loss  $L$  per one wave of surface acoustic wave ] a simulation.

[0030] As shown in drawing 2, even if an angle theta changes, the phase velocity of Book SAW is always very as high-speed as 5000 - 7500 m/sec, is quicker than the quick traverse wave of a bulk wave, and does not exceed the phase velocity of a longitudinal wave. Moreover, as shown in drawing 3, Book SAW is generated in the latus range whose angle theta is 25 degrees - 90 degrees, at 38 degrees - 70 degrees, 0.6% or more, especially an angle theta are obtained, and 1% or more of electromechanical coupling coefficient is obtained for an angle theta at 40 degrees - 60 degrees. Furthermore, as shown in drawing 4, the angle theta of a propagation loss is small at about 55 degrees or less.

[0031] Therefore, Book SAW has a large electromechanical coupling coefficient at within the limits whose angle theta is 38 degrees - 55 degrees, and a propagation loss becomes small. Especially, in the range whose angle theta is 45 degrees - 50 degrees, a propagation loss becomes smaller. In these ranges, since about 1/of Rayleigh waves is the speed of 3000 - 4000 m/sec of 2 compared with Book SAW, the Leakey wave does not exist.

[0032] Drawing 5 or drawing 7 is the phase velocity  $v_p$  at the time of making the propagation direction of a surface acoustic wave into (15 degrees, theta, 90 degrees) by Eulerian-angle display, and changing an angle theta, an electromechanical coupling coefficient  $k_2$ , and as a result of [ of a propagation loss  $L$  ] a simulation. Moreover, drawing 8 or drawing 10 is the phase velocity  $v_p$  at the time of making the propagation direction of a surface acoustic wave into (30 degrees, theta, 90 degrees) by Eulerian-angle display, and changing an angle theta, an electromechanical coupling coefficient  $k_2$ , and as a result of [ of a propagation loss  $L$  ] a simulation. Furthermore, drawing 11 or drawing 13 is the phase velocity  $v_p$  at the time of making the propagation direction of a surface acoustic wave into (45 degrees, theta, 90 degrees) by Eulerian-angle display, and changing an angle theta, an electromechanical coupling coefficient  $k_2$ , and as a result of [ of a propagation loss  $L$  ] a simulation.

[0033] When the symmetric property of a tetraboric acid lithium is taken into consideration so that clearly from these drawing 2 or drawing 13, regardless of the angle phi of an Eulerian-angle display (phi, theta, psi), the book SAW with a quick phase velocity exists in within the limits whose angle theta is 30 degrees - 90 degrees, and within the limits whose angle theta is 38 degrees - 55 degrees understands that phase velocity is quick, an electromechanical coupling coefficient is large, and a propagation loss is small for Book SAW. Especially, in the range which is 45 degrees - 50 degrees, the propagation loss of Book SAW has a still smaller angle theta. Moreover, the phase velocity of Book SAW is quicker than the quick traverse wave of a bulk wave, and does not exceed the phase velocity of a longitudinal wave.

[0034] Next, simulation calculation of the propagation property of the surface acoustic wave in the cut (011) side (they are (0 degree, 47.3 degrees, psi) by Eulerian-angle display) of a piezo-electric substrate was carried out. Drawing 14 or drawing 16 is the phase velocity  $v_p$  at the time of being referred to as (0 degree, 47.3 degrees, psi) by Eulerian-angle display, and changing an angle psi, an electromechanical coupling coefficient  $k_2$ , and as a result of [ of a propagation loss  $L$  ] a simulation.

[0035] The phase velocity of Book SAW is always very as high-speed as 7000 - 7500 m/sec, even if an angle theta changes, as shown in drawing 14. Moreover, as shown in drawing 15, Book SAW exists in the range whose angle psi is 40 degrees - 90 degrees, and a high electromechanical coupling coefficient is obtained in the range whose angle psi is 80 degrees - 90 degrees. Furthermore, as shown in drawing 16, as for the propagation loss of Book SAW, an angle psi becomes very low in 88 degrees - 90 degrees. Therefore, when an angle psi is 90 degrees, an electromechanical coupling coefficient serves as the maximum and, as for Book SAW, a propagation loss serves as the minimum.

[0036] Next, simulation calculation of the propagation property of a surface acoustic wave in case the propagation directions of a surface acoustic wave are (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees) in an Eulerian-angle display was carried out. Drawing 17 or drawing 20 makes an electrode material the

metallic material which makes aluminum a principal component, and the calculation result of the phase velocity  $v_p$  at the time of changing the thickness of an electrode, an electromechanical coupling coefficient  $k^2$ , a propagation loss  $L$ , and the frequency temperature coefficient TCF is shown. Setting to this simulation calculation, electric opening is  $x_3$  at the interface of a metal membrane and a substrate. In thing  $[x_3 = 0$  whose electric flux density of a direction is zero,  $D_3 = 0]$  was meant, and in thing  $[x_3 = 0$  whose potential of a metal membrane is zero as electric simplistic, it calculated for meaning  $\phi = 0]$ .

[0037] If standardization thickness  $h/\lambda$  which standardized the thickness  $h$  of an electrode on the wavelength  $\lambda$  of a surface acoustic wave is changed to 6.0% from 0.0%, as are shown in drawing 17, and phase velocity falls gradually and is shown in drawing 18, an electromechanical coupling coefficient will increase from 1.2% to 3.1%. Moreover, it turns out that standardization thickness  $h/\lambda$  of a propagation loss is very as low as 0.01 or less dB/ $\lambda$  as shown in drawing 19 in 0.0 to 6.0% of range. Furthermore, as a frequency temperature coefficient is shown in drawing 20, in 0.0 to 5.0% of range, the outstanding temperature characteristic about 20 ppm [ $^{\circ}\text{C}$ ] or less is obtained for standardization thickness  $h/\lambda$ .

[0038] Next, in order to check the property of Book SAW, it calculated about the variation rate of the depth direction of a substrate, and the potential distribution. In the case of (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees), the propagation direction of a surface acoustic wave of drawing 21 and drawing 22 is in an Eulerian-angle display as a result of [ in case the standardization thickness of an electrode (aluminum) is 3% ] a simulation. Drawing 21 is as a result of [ in electric opening ] calculation, and drawing 22 is as a result of [ in an electric short circuit ] calculation. In drawing 21 and drawing 22, a horizontal axis is the relative-amplitude value of a variation rate  $U_1$  (variation rate of the  $x_1$  direction), a variation rate  $U_3$  (variation rate of the  $x_3$  direction), and the electrostatic potential  $\phi$ , and a vertical axis is the standardization depth from the substrate front face standardized on wavelength.

[0039] It is concentrating near a substrate front face and the variation rate of a surface acoustic wave and electrostatic potential have a dominant longitudinal-wave component so that clearly from drawing 21 and drawing 22. Thus, since according to the 1st this invention it is an Eulerian-angle display (0 degree - 45 degrees, 30 degrees - 90 degrees, 40 degrees - 90 degrees) and the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave were made into within the limits equivalent to it, velocity of propagation can realize the surface-acoustic-wave equipment using the high-speed surface acoustic wave quicker than a Rayleigh wave and the Leakey wave.

[0040] Moreover, since according to the 2nd this invention it is an Eulerian-angle display (0 degree - 45 degrees, 38 degrees - 55 degrees, 80 degrees - 90 degrees) and the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave were made into within the limits equivalent to it, velocity of propagation can realize quickly the surface-acoustic-wave equipment with which the electromechanical coupling coefficient used sufficient surface acoustic wave.

[0041] furthermore, this range -- and (0 degree - 45 degrees, 45 degrees - 50 degrees, 80 degrees - 90 degrees) the range, then a propagation loss equivalent to it are low enough, and velocity of propagation can realize the surface-acoustic-wave equipment using surface acoustic wave with a sufficient electromechanical coupling coefficient quickly. If the electrode of surface-acoustic-wave equipment consists of metals which make aluminum a principal component and makes standardization thickness of an electrode about 5% or less further again, an electromechanical coupling coefficient can use a bigger surface acoustic wave, and can realize surface-acoustic-wave equipment excellent in the temperature characteristic.

[0042] In addition, since it has the symmetric property of 4mm of point groups and the property of a surface acoustic wave also has predetermined symmetric property, a tetraboric acid lithium single crystal also includes the equivalent (0 degree - 360 degrees, 38 degrees - 55 degrees, 80 degrees - 100 degrees) direction of the direction shown by the above-mentioned Eulerian angle.

[0043]

[Example] The surface-acoustic-wave equipment by one example of this invention is explained using drawing 23 or drawing 28. The surface-acoustic-wave equipment by this example is shown in drawing 23. The surface-acoustic-wave equipment of this example is a transversal filter, the input Kushigata electrode 22 and the output Kushigata electrode 23 which consist of a double interchange digital electrode of electrode line breadth  $\lambda/8$  are formed in the front face of the piezo-electric substrate 21 which consists of a tetraboric acid lithium single crystal whose principal plane is a field (011), and the metal membrane 24 is formed in the propagation field between these input Kushigata electrode 22 and the output Kushigata electrode 23.

[0044] The input Kushigata electrode 22 and the output Kushigata electrode 23 are 20 pairs, the period of 8 micrometers (electrode line breadth of 1 micrometer), and 400 micrometers of opening length, and are formed in sense from which the propagation direction of a surface acoustic wave becomes (0 degree, 47.3

degrees, 90 degrees) by Eulerian-angle display, respectively. The input tandem-type electrode 22, the output Kushigata electrode 23, and the metal membrane 24 are formed with the aluminum film of the same thickness.

[0045] The velocity of propagation of a surface acoustic wave was measured from the frequency of the peak of the passage frequency characteristic, the electromechanical coupling coefficient of a surface acoustic wave was measured from the radiation admittance of a tandem-type electrode, the propagation loss of a surface acoustic wave was measured from change of the insertion loss at the time of changing propagation path length with  $100\lambda$  ( $\lambda$  being the wavelength of a surface acoustic wave),  $200\lambda$ , and  $300\lambda$ , and the frequency temperature coefficient TCF of a surface acoustic wave was measured from the temperature change of the phase of the passage frequency characteristic.

[0046] The thickness of drawing 24 of an aluminum film is as a result of [ of the passage frequency characteristic in case the length of 177nm (2.2% as standardization thickness) and a propagation path is 800 micrometers ] measurement. The peak corresponding to Book SAW has appeared in the position with a frequency of 832MHz so that clearly from drawing 24 . The insertion loss of this book SAW is as small as 13.7dB, and velocity of propagation is very as high-speed as 6656 m/sec.

[0047] Moreover, the peak corresponding to the Rayleigh wave has appeared in the position with a frequency of 400MHz. The insertion loss of this Rayleigh wave is 24.1dB, and velocity of propagation is 3204 m/sec. An experiment and the calculation of a Rayleigh wave [ Book SAW and ] correspond well. The measurement result (· shows) of the velocity of propagation at the time of changing the thickness of an aluminum film, an electromechanical coupling coefficient, a propagation loss, and a frequency temperature coefficient is shown in drawing 25 , drawing 26 , drawing 27 , and drawing 28 with a calculation result, respectively.

[0048] The experimental result was well in agreement with the calculation result, and the propagation property good as surface-acoustic-wave equipment for RFs was acquired so that clearly from drawing 25 or drawing 28 . For example, when the standardization thickness of an aluminum film is 2%, as for a propagation loss, about 0.016 dB/ $\lambda$  is obtained about 2.8%, and, as for about 6650 m/sec and an electromechanical coupling coefficient, an about [ +30ppm/degree C ] propagation property is acquired for velocity of propagation, as for TCF.

[0049] Next, the surface-acoustic-wave equipment by other examples of this invention is explained using drawing 29 . Like the surface-acoustic-wave equipment which shows the surface-acoustic-wave equipment of this example to drawing 23 , the input Kushigata electrode 22 and the output Kushigata electrode 23 are formed in the front face of the piezo-electric substrate 21 which consists of a tetraboric acid lithium single crystal, and the metal membrane 24 is formed in the propagation field between these input Kushigata electrode 22 and the output Kushigata electrode 23. By the Eulerian-angle display, the logging angle of the piezo-electric substrate 21 and the propagation direction of a surface acoustic wave are (45 degrees, 40 degrees, 90 degrees), and produced other composition like the above-mentioned example.

[0050] The thickness of drawing 29 of an aluminum film is as a result of [ of the passage frequency characteristic in case the length of 245nm (2.2% as standardization thickness) and a propagation path is 800 micrometers ] measurement. The peak corresponding to Book SAW has appeared in the position with a frequency of 883MHz so that clearly from drawing 29 . The insertion loss of this book SAW is as small as 38.5dB, velocity of propagation is very as high-speed as 7070 m/sec, and an electromechanical coupling coefficient is 1.6%.

[0051] Moreover, the peak corresponding to the Rayleigh wave has appeared in the position with a frequency of 389MHz. The insertion loss of this Rayleigh wave is 25.6dB, and velocity of propagation is 3110 m/sec. The experimental result of a Rayleigh wave [ Book SAW and ] corresponds in a calculation result well. Not only the above-mentioned example but various deformation is possible for this invention.

[0052] In the above-mentioned example, as are shown in drawing 30 (a) and the input tandem-type electrode 22 and the output Kushigata electrode 23 are shown in the front face of the piezo-electric substrate 21 on it at drawing 30 although the electrode finger 25 of the tandem-type electrodes 22 and 23 is directly formed in piezo-electric substrate 21 front face of surface-acoustic-wave equipment, various cross-section structures are possible. For example, as shown in drawing 30 (b), between the electrode fingers 25 may be fill uped with the insulating layers 26, such as SiO<sub>2</sub> and aluminum 2O<sub>3</sub>. moreover, it is shown in drawing 30 (c) -- as -- the electrode finger 25 whole -- SiO<sub>2</sub> and aluminum 2O<sub>3</sub> etc. -- you may bury by the insulating layer 27 Moreover, as shown in drawing 30 (d), you may form the electrode finger 25 on the insulating layer 27 formed on the piezo-electric substrate 21. Moreover, as shown in drawing 30 (e), piezo-electric substrate 21 front face may be dug, a slot may be formed, and the electrode finger 25 may be buried in the slot. In addition, it is considered that the thickness h of drawing 30 (c) and the electrode in (d) is the thickness which applied the thickness of the electrode finger 25 and an insulating

layer 27.

[0053] Moreover, the metallic material which makes a principal component the gold other than the metallic material which makes aluminum a principal component can also be used for the metal which constitutes the Kushigata electrode of surface-acoustic-wave equipment. You may add silicon, copper, etc. to these metallic materials. Moreover, it is good also as an electrode of multilayer structure combining a titanium layer, a tungsten layer, etc. Furthermore, although the surface-acoustic-wave equipment of the above-mentioned example was the transversal filter which prepared the metal membrane on the propagation path, it is not necessary to prepare a metal membrane on a propagation path.

[0054] Moreover, different structure is sufficient as the surface-acoustic-wave equipment of the above-mentioned example. For example, this invention is applicable also to the resonator type filter which prepared the tandem-type electrode between the grating reflectors of a couple, and a resonator. Moreover, this invention is also applicable also to the surface-acoustic-wave equipment of structure (IIDT structure) which connected many tandem-type electrodes in parallel.

[0055]

[Effect of the Invention] Since according to the 1st this invention it is an Eulerian-angle display (0 degree - 45 degrees, 30 degrees - 90 degrees, 40 degrees - 90 degrees) and the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave were made into within the limits equivalent to it as explained above, velocity of propagation can realize the surface-acoustic-wave equipment using the high-speed surface acoustic wave quicker than a Rayleigh wave and the Leakey wave.

[0056] Moreover, since according to the 2nd this invention it is an Eulerian-angle display (0 degree - 45 degrees, 38 degrees - 55 degrees, 80 degrees - 90 degrees) and the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate and the propagation direction of a surface acoustic wave were made into within the limits equivalent to it, velocity of propagation can realize quickly the surface-acoustic-wave equipment with which the electromechanical coupling coefficient used sufficient surface acoustic wave.

[0057] furthermore, this range -- and (0 degree - 45 degrees, 45 degrees - 50 degrees, 80 degrees - 90 degrees) the range, then a propagation loss equivalent to it are low enough, and velocity of propagation can realize the surface-acoustic-wave equipment using surface acoustic wave with a sufficient electromechanical coupling coefficient quickly. If the electrode of surface-acoustic-wave equipment consists of metals which make aluminum a principal component and makes standardization thickness of an electrode about 5% or less further again, an electromechanical coupling coefficient can use a bigger surface acoustic wave, and can realize surface-acoustic-wave equipment excellent in the temperature characteristic.

[0058] Therefore, according to this invention, velocity of propagation is quick, sufficient electromechanical coupling coefficient is obtained, a propagation loss is low, and since the equipment using the surface acoustic wave excellent also in the temperature characteristic is realizable, it can respond to the demand of the further high frequency operation enough.

---

[Translation done.]

**\* NOTICES \***

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

**DESCRIPTION OF DRAWINGS**

---

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] It is drawing having shown the system of coordinates used for the simulation of a surface acoustic wave, and boundary condition.

[Drawing 2] Phase velocity  $v_p$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (0 degree,  $\theta$ , 90 degrees) in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face It is the graph which shows a simulation result.

[Drawing 3] Electromechanical coupling coefficient  $k_2$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (0 degree,  $\theta$ , 90 degrees) in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face It is the graph which shows a simulation result.

[Drawing 4] In the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face, it is the graph which shows the simulation result of the propagation loss  $L$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (0 degree,  $\theta$ , 90 degrees).

[Drawing 5] Phase velocity  $v_p$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (15 degrees,  $\theta$ , 90 degrees) in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face It is the graph which shows a simulation result.

[Drawing 6] Electromechanical coupling coefficient  $k_2$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (15 degrees,  $\theta$ , 90 degrees) in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face It is the graph which shows a simulation result.

[Drawing 7] In the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face, it is the graph which shows the simulation result of the propagation loss  $L$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (15 degrees,  $\theta$ , 90 degrees).

[Drawing 8] Phase velocity  $v_p$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (30 degrees,  $\theta$ , 90 degrees) in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face It is the graph which shows a simulation result.

[Drawing 9] Electromechanical coupling coefficient  $k_2$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (30 degrees,  $\theta$ , 90 degrees) in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face It is the graph which shows a simulation result.

[Drawing 10] In the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face, it is the graph which shows the simulation result of the propagation loss  $L$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (30 degrees,  $\theta$ , 90 degrees).

**[Drawing 11]** Phase velocity  $v_p$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (45 degrees,  $\theta$ , 90 degrees) in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face. It is the graph which shows a simulation result.

**[Drawing 12]** Electromechanical coupling coefficient  $k_2$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (45 degrees,  $\theta$ , 90 degrees) in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face. It is the graph which shows a simulation result.

**[Drawing 13]** In the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face, it is the graph which shows the simulation result of the propagation loss  $L$  at the time of changing the logging angle of a tetraboric acid lithium single crystal substrate, and the angle  $\theta$  of the propagation direction (45 degrees,  $\theta$ , 90 degrees).

**[Drawing 14]** Phase velocity  $v_p$  at the time of changing the propagation direction  $\psi$  on the cut (011) side of a tetraboric acid lithium single crystal substrate in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face. It is the graph which shows a simulation result.

**[Drawing 15]** Electromechanical coupling coefficient  $k_2$  at the time of changing the propagation direction  $\psi$  on the cut (011) side of a tetraboric acid lithium single crystal substrate in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face. It is the graph which shows a simulation result.

**[Drawing 16]** In the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face, it is the graph which shows the simulation result of the propagation loss  $L$  at the time of changing the propagation direction  $\psi$  on the cut (011) side of a tetraboric acid lithium single crystal substrate.

**[Drawing 17]** Phase velocity  $v_p$  at the time of making the logging angle and the propagation direction of a tetraboric acid lithium single crystal substrate into an Eulerian angle (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees), and changing standardization thickness  $h/\lambda$  of an electrode in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face. It is the graph which shows a simulation result.

**[Drawing 18]** Electromechanical coupling coefficient  $k_2$  at the time of making the logging angle and the propagation direction of a tetraboric acid lithium single crystal substrate into an Eulerian angle (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees), and changing standardization thickness  $h/\lambda$  of an electrode in the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face. It is the graph which shows a simulation result.

**[Drawing 19]** In the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face, it is the graph which shows the simulation result of the propagation loss  $L$  at the time of making the logging angle and the propagation direction of a tetraboric acid lithium single crystal substrate into an Eulerian angle (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees), and changing standardization thickness  $h/\lambda$  of an electrode.

**[Drawing 20]** In the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed in the tetraboric acid lithium single crystal substrate front face, it is the graph which shows the simulation result of the frequency temperature coefficient TCF at the time of making the logging angle and the propagation direction of a tetraboric acid lithium single crystal substrate into an Eulerian angle (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees), and changing standardization thickness  $h/\lambda$  of an electrode.

**[Drawing 21]** In the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed, it is the graph which shows the displacement distribution  $U_1$  of the depth direction of a substrate in case a substrate front face is electric opening,  $U_3$ , and the simulation result of the potential distribution  $\phi$  so that the propagation direction of a surface acoustic wave may become (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees) on a tetraboric acid lithium single crystal substrate front face.

**[Drawing 22]** In the surface-acoustic-wave equipment with which the electrode which makes aluminum a principal component was formed, it is the graph which shows the displacement distribution  $U_1$  of the depth direction of a substrate in case a substrate front face is an electric short circuit,  $U_3$ , and the simulation result of the potential distribution  $\phi$  so that the propagation direction of a surface acoustic wave may become (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees) on a tetraboric acid lithium single crystal substrate.

front face.

[Drawing 23] It is drawing showing the surface-acoustic-wave equipment by one example of this invention.

[Drawing 24] It is the graph which shows the passage frequency characteristic of the surface-acoustic-wave equipment (a logging angle and the propagation direction are (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees) by Eulerian-angle display) by one example of this invention.

[Drawing 25] Phase velocity  $v_p$  at the time of changing standardization thickness  $h/\lambda$  of an electrode in the surface-acoustic-wave equipment (a logging angle and the propagation direction being (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees) by Eulerian-angle display) by one example of this invention It is the graph which shows a measurement result and a simulation result.

[Drawing 26] Electromechanical coupling coefficient  $k_2$  at the time of changing standardization thickness  $h/\lambda$  of an electrode in the surface-acoustic-wave equipment (a logging angle and the propagation direction being (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees) by Eulerian-angle display) by one example of this invention It is the graph which shows a measurement result and a simulation result.

[Drawing 27] In the surface-acoustic-wave equipment (a logging angle and the propagation direction are (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees) by Eulerian-angle display) by one example of this invention, it is the graph which shows the measurement result and simulation result of a propagation loss  $L$  at the time of changing standardization thickness  $h/\lambda$  of an electrode.

[Drawing 28] In the surface-acoustic-wave equipment (a logging angle and the propagation direction are (0 degree, 47.3 degrees, 90 degrees) by Eulerian-angle display) by one example of this invention, it is the graph which shows the measurement result and simulation result of the frequency temperature coefficient TCF at the time of changing standardization thickness  $h/\lambda$  of an electrode.

[Drawing 29] It is the graph which shows the passage frequency characteristic of the surface-acoustic-wave equipment (a logging angle and the propagation direction are (45 degrees, 40 degrees, 90 degrees) by Eulerian-angle display) by other examples of this invention.

[Drawing 30] It is drawing showing the various cross-section structures of the tandem-type electrode of the surface-acoustic-wave equipment of this invention.

[Drawing 31] It is drawing for explaining an Eulerian-angle display.

[Description of Notations]

- 21 -- Piezo-electric substrate
- 22 -- Input tandem-type electrode
- 23 -- Output tandem-type electrode
- 24 -- Metal membrane
- 25 -- Electrode finger
- 26 -- Insulating layer
- 27 -- Insulating layer

---

[Translation done.]



(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-112763

(43)公開日 平成6年(1994)4月22日

(51)Int.Cl.<sup>5</sup>

H 0 3 H 9/25

識別記号

庁内整理番号

C 7259-5 J

F I

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数5(全 13 頁)

(21)出願番号 特願平5-42642

(22)出願日 平成5年(1993)3月3日

(31)優先権主張番号 特願平4-88409

(32)優先日 平4(1992)3月13日

(33)優先権主張国 日本(JP)

(71)出願人 000231109

株式会社ジャパンエナジー

東京都港区虎ノ門二丁目10番1号

(72)発明者 佐藤 隆裕

埼玉県戸田市新曽南三丁目17番35号 株式

会社日鉱共石内

(72)発明者 阿部 秀典

埼玉県戸田市新曽南三丁目17番35号 株式

会社日鉱共石内

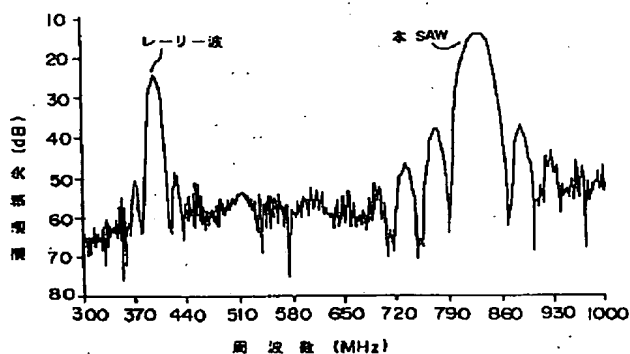
(74)代理人、弁理士 北野 好人

(54)【発明の名称】 弾性表面波装置

(57)【要約】

【目的】 信号処理の対象周波数が1GHz以上であるような弾性表面波装置を実用化するために、四ほう酸リチウム単結晶基板を用いて伝搬速度が速く、かつ伝搬損失の少ない表面波を利用する弾性表面波装置を提供する。

【構成】 四ほう酸リチウム単結晶からなる圧電基板と、圧電基板の表面に形成され、弾性表面波を励起、受信、反射、伝搬するための電極とを有する弾性表面波装置において、圧電基板の表面の切り出し角および弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で(0°~45°、30°~90°、40°~90°)およびそれと等価な範囲内になるように電極が形成されている。弾性表面波は、レイリー波およびリーキー波よりも高速であり、伝搬にともない圧電基板内に前記弾性表面波のエネルギーの一部分を放射する特性を有している。



(2)

2

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 四ほう酸リチウム単結晶からなる圧電基板と、前記圧電基板の表面に形成され、弾性表面波を励起、受信、反射、伝搬するための電極とを有する弾性表面波装置において、

前記圧電基板の表面の切り出し角および弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で（ $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 、 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、 $40^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）およびそれと等価な範囲内になるように前記電極が形成され、

前記弾性表面波の速度が同一方向に伝搬するバルク波の速い横波の速度以上であり、縦波の速度を越えないことを特徴とする弾性表面波装置。

【請求項2】 四ほう酸リチウム単結晶からなる圧電基板と、前記圧電基板の表面に形成され、弾性表面波を励起、受信、反射、伝搬するための電極とを有する弾性表面波装置において、

前記圧電基板の表面の切り出し角および弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で（ $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 、 $38^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 、 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）およびそれと等価な範囲内になるように前記電極が形成されていることを特徴とする弾性表面波装置。

【請求項3】 請求項1又は2記載の弾性表面波装置において、

前記圧電基板の表面の切り出し角および弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で（ $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 、 $45^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）およびそれと等価な範囲内になるように前記電極が形成されていることを特徴とする弾性表面波装置。

【請求項4】 請求項3記載の弾性表面波装置において、

前記圧電基板の表面の切り出し角および弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で（ $0^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 、 $45^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、 $88^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）およびそれと等価な範囲内になるように前記電極が形成されていることを特徴とする弾性表面波装置。

【請求項5】 請求項1乃至4のいずれかに記載の弾性表面波装置において、

前記電極がアルミニウムを主成分とする金属により形成され、

前記電極の規格化膜厚が約5%以下であることを特徴とする弾性表面波装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、四ほう酸リチウム単結晶（ $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ）を用いた弾性表面波装置に関する。

## \* 【0002】

【従来の技術】 弾性表面波装置は、電気信号を表面波に変換することで、信号処理を行う回路素子であり、フィルタ、共振子、遅延線などに用いられている。通常、圧電性のある弾性体基板（圧電基板）上に櫛型電極（IDT、すだれ状電極）と呼ばれる金属電極を設けることで電気信号から表面波への変換・逆変換を行っている。

【0003】 弾性表面波としてはレイリー波が主に用いられている。レイリー波は、弾性体の表面を伝搬する表面波であり、そのエネルギーを圧電基板内へ放散することなく、すなわち、理論上伝搬損失なく伝搬する。レイリー波を利用した弾性表面波装置に用いられる基板材料として、水晶、タンタル酸リチウム（ $\text{LiTaO}_3$ ）などが知られている。水晶は、温度安定性に優れるが圧電性に乏しい。逆に、タンタル酸リチウムは、圧電性に優れるが温度安定性が劣っている。近年、これらの特性とともに満たす材料として、四ほう酸リチウム単結晶が注目されている（例えば、特公平2-44169号公報、特公昭63-40044号公報を参照）他方、弾性表面波としてリーキー波と呼ばれる弾性体の深さ方向にエネルギーを放散しながら伝搬する弾性表面波（漏洩弾性表面波）を利用することが検討されている。一般にリーキー波は放散による伝搬損失が大きく弾性表面波装置に利用できないが、特別な切り出し角および伝搬方向では比較的伝搬損失が少ないため利用可能である。例えば、 $4200\text{m/sec}$ 程度の速度の得られる $36^{\circ}\text{Y-X}$ カットのタンタル酸リチウムを用いた弾性表面波装置が知られている。

【0004】 レイリー波やリーキー波は、以下に説明する関係式より、その特性を計算することができる（J.J. Campbell, W.R. Jones, "A Method for Estimating Optimal Crystal Cuts and Propagation Directions for Excitation of Piezoelectric Surface Waves", IEEE transaction on Sonics and Ultrasonics, vol. SU-15, No. 4, pp. 209-217, (1968); T.C. Lim, G.W. Farnell, "Character of Pseudo Surface Waves on Anisotropic Crystals", The Journal of Acoustical Society of America, vol. 45, no. 4, pp. 845-851, (1968)）。

【0005】 一般に、圧電基板表面を伝搬する弾性表面波の伝搬特性は、ある境界条件の下で運動方程式及びマクスウェルの方程式を準静電近似した電荷方程式を解くことで求めることができる。運動方程式と電荷方程式を次に示す。

## 【0006】

## 【数1】

$$C_{ijkl}U_{k,li} + e_{kij}\phi_{,ki} = \rho \ddot{U}_j \quad \dots (1)$$

\*

## 【0007】

## 【数2】

(3)

$$e_{ijkl} U_{k,li} - \epsilon_{ik} \phi_{,ki} = 0 \quad \dots (2)$$

ただし、 $c_{ijkl}$  ( $i, j, k, l = 1, 2, 3$ ) は弾性定数のテンソル、 $e_{kij}$  ( $i, j, k = 1, 2, 3$ ) は圧電定数のテンソル、 $\epsilon_{ik}$  ( $i, k = 1, 2, 3$ ) は誘電定数のテンソル、 $\rho$  は密度である。 $U_i$  は図1に示す座標系における各方向 ( $X_1$  を弾性表面波の伝搬方向、 $X_2$  を圧電基板表面に含まれる弾性表面波の伝搬方向  $X$  \*

\* $_1$  に垂直な方向、 $X_3$  を  $X_1$  および  $X_2$  に垂直な方向とする) の変位を示し、 $\Phi$  は静電電位を示し、それぞれ次式で示される。

【0008】

【数3】

$$U_i = \beta_i \cdot e^{j\pi(\alpha x_3 + x_1 - vt)} \quad \dots (3)$$

【0009】

※ ※ 【数4】

$$\Phi = \beta_4 \cdot e^{j\pi(\alpha x_3 + x_1 - vt)} \quad \dots (4)$$

ただし、 $\alpha$  は  $x_3$  方向の減衰定数、 $\beta_i$  は振幅定数、 $\kappa$  は波数、 $t$  は時間、 $v$  は位相速度である。まず、レイリー波の計算の手順を説明する。実数の位相速度  $v$  を仮定して、上記変位  $U_i$  を示す式 (3)、静電電位  $\Phi$  を示す式 (4) を、運動方程式 (1) と電束密度連続の式

(2) に代入し、振幅定数  $\beta_i$  について整理すると、実数を係数とする減衰定数  $\alpha$  の8次方程式が得られる。この8次方程式を解くことで、減衰定数  $\alpha$  は共役複素数の解が得られる。

【0010】表面波であるためには、波の振幅が基板の深さ方向に対して減少しなければならないので、減衰定数  $\alpha$  は虚数部が負である解 [ $\text{Im}(\alpha(n)) < 0, n = 1, 2, 3, 4$ ] を選択することになる。選択された ★

★それぞれの減衰定数  $\alpha$  に対応して4つの振幅定数  $\beta_1 \sim \beta_4$  が算出される。この対応した振幅定数  $\beta_i$  を参照することで、4つの減衰定数  $\alpha$  は、 $x_1$  方向の変位を主成分とする縦波成分、 $x_2$  方向又は  $x_3$  方向の変位を主成分とする2種類の横波成分、及び静電電位を主成分とする電磁波成分にそれぞれ対応していることがわかる。これら4つの弾性表面波の成分が伝搬可能であるので、伝搬しうる弾性表面波の各方向の変位  $U_i$  および静電電位  $\Phi$  は、それぞれ次式のように4つのモードの線形結合で表すことができる。

【0011】

【数5】

$$U_i = \sum_{n=1}^4 A^{(n)} \cdot \beta_i^{(n)} \cdot e^{j\pi(\alpha^{(n)} x_3 + x_1 - vt)} \quad \dots (5)$$

【0012】

☆ ☆ 【数6】

$$\Phi = \sum_{n=1}^4 A^{(n)} \cdot \beta_4^{(n)} \cdot e^{j\pi(\alpha^{(n)} x_3 + x_1 - vt)} \quad \dots (6)$$

ただし、 $A^{(n)}$  は各モードの振幅比を示す。次に、上記式 (5)、(6) に境界条件を与えることにより、弾性表面波の伝搬特性を解くようにする。境界条件としては、弾性体表面での応力が零であることを示す機械的境界条件 [ $x_3 = 0$  において、 $T_{13} = T_{23} = T_{33} = 0$ ] と、圧電基板表面が開放されている、すなわち、表面での電束密度の  $x_3$  方向成分が零という電気的境界条件 [ $x_3 = 0$  において、 $D_3 = 0$ ] と、表面短絡の場合に表面での電位が零であるという境界条件 [ $x_3 = 0$  において、 $\Phi = 0$ ] である。これら境界条件を満足するような位相速度  $v$  を求めることで、レイリー波と呼ばれる弾性表面波の伝搬特性を解くことができる。

【0013】次に、リーキー波の計算手順を説明する。

上述のレイリー波の計算において、上記式 (3)、

(4) を式 (1)、(2) に代入して減衰定数  $\alpha$  を求め

る際に、仮定する位相速度  $v$  の値によって、減衰定数  $\alpha$  の解が共役複素数とならずに実数になることがある。例えば、レイリー波よりも速い位相速度  $v$  を仮定した場合、一方の横波成分 (以下「第1の横波成分」という) に対応した減衰定数  $\alpha$  の虚数部は零 (すなわち、実根) となり、圧電基板の深さ方向に対して減衰しない成分が存在する。したがって、弾性表面波のエネルギーは基板表面に完全には集中せず、エネルギーを圧電基板の深さ方向に放散するため、伝搬損失を生じる。

【0014】この場合、伝搬損失の数字上の表現として位相速度  $v$  を複素数として算出すると、減衰定数  $\alpha$  を求めるための8次方程式の係数も複素数になる。この減衰定数  $\alpha$  の8つの解から、第1の横波成分以外の3つの成分に対応し、振幅が基板の深さ方向に対して減少する解を3つ選択する。さらに、他の1つの解として、第1の

20

40

50

5

横波成分に対応し、振幅が基板の深さ方向に対し増大する解を選択し、上記式(5)、(6)に上述した境界条件を与えることにより、弾性表面波の伝搬特性を解くようにする。このようにして解かれた弾性表面波は、一般にリーキー波(漏洩弾性表面波)と呼ばれる。

【0015】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、四ほう酸リチウム単結晶を基板材料に用いた弾性表面波装置においては、レイリー波の伝搬速度は比較的遅く、また、伝搬損失の充分に低いリーキー波も見出されていないため、その信号処理の対象周波数を高くすることが困難であった。

【0016】すなわち、櫛型電極(IDT)の電極幅および電極間隔は、通常、対象とする信号周波数に対応した弾性表面波の波長の4分の1( $\lambda/4$ )に設定される。四ほう酸リチウム単結晶上のレイリー波の伝搬速度は3400m/sec程度であり、1GHz以上の信号周波数を対象とするためには1 $\mu$ m以下の電極幅および電極間隔が必要となる。そのため、櫛型電極の製造歩留まりが低下し、弾性表面波装置の製造が著しく困難となる。

【0017】本発明の目的は、信号処理の対象周波数が1GHz以上であるような弾性表面波装置を実用化するために、四ほう酸リチウム単結晶基板を用いて伝搬速度が速く、かつ伝搬損失の少ない表面波を利用する弾性表面波装置を提供することにある。

【0018】

【課題を解決するための手段及び作用】第1の本発明による弾性表面波装置は、四ほう酸リチウム単結晶からなる圧電基板と、圧電基板の表面に形成され、弾性表面波を励起、受信、反射、伝搬するための電極とを有する弾性表面波装置において、圧電基板の表面の切り出し角および弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $30^\circ \sim 90^\circ$ 、 $40^\circ \sim 90^\circ$ )およびそれと等価な範囲内になるように電極が形成され、弾性表面波の速度が同一方向に伝搬するバルク波の速い横波の速度以上であり、縦波の速度を越えないことを特徴とする。

【0019】また、第2の本発明による弾性表面波装置は、四ほう酸リチウム単結晶からなる圧電基板と、圧電基板の表面に形成され、弾性表面波を励起、受信、反射、伝搬するための電極とを有する弾性表面波装置において、圧電基板の表面の切り出し角および弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $38^\circ \sim 55^\circ$ 、 $80^\circ \sim 90^\circ$ )およびそれと等価な範囲内になるように電極が形成されていることを特徴とする。この場合、圧電基板の表面である基板切り出し面としては、

(011)、(345)、(255)、(231)、(356)、(112)、(123)、(233)、(134)、(122)、(234)、(023)、(145)、(156)、(165)、(347)など

(4)

6

を用いることができる。

【0020】さらに、圧電基板の表面の切り出し角および弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $45^\circ \sim 50^\circ$ 、 $80^\circ \sim 90^\circ$ )およびそれと等価な範囲内に電極が形成されていることが望ましい。また、基板切り出し面としては、(011)、(345)、(255)、(231)、(356)などを用いることが望ましい。特に、基板切り出し面として(011)面を用いることができる範囲内、すなわち、オイラ角表示で( $0^\circ \sim 2^\circ$ 、 $45^\circ \sim 50^\circ$ 、 $88^\circ \sim 90^\circ$ )およびそれと等価な範囲内に電極が形成されていることが望ましい。

【0021】さらにまた、電極がアルミニウムを主成分とする金属により形成され、電極の膜厚が弾性表面波波長の約5%以下であることが望ましい。本願発明者らは、基板の切り出し角及び弾性表面波の伝搬方向を特定の範囲に設定した場合、縦波成分を主成分として圧電基板内部に2種類の横波成分をバルク波として放射しながら圧電基板の表面を伝搬する弾性表面波(本SAW)が存在することを予測し、シミュレーションにより確認した。

【0022】本SAWは、リーキー波の理論を更に発展させたもので、リーキー波よりも速い実数の位相速度 $v$ を仮定した場合、2種類の横波成分に対応した減衰定数の虚数部が共に零(すなわち、共に実根)となり、圧電基板の深さ方向に減衰しない成分が2種類存在する。本SAWのシミュレーションでは、上述した式(3)、

(4)を式(1)、(2)に代入して、複素数に拡張した位相速度 $v$ から減衰定数 $\alpha$ を求める際に、2種類の横波成分(第1の横波成分及び第2の横波成分)に対応し、振幅が基板の深さ方向に対して増大する解をそれぞれ選択し、他の2つの減衰定数 $\alpha$ として縦波成分及び電磁波成分に対応し、振幅が基板の深さ方向に対して減少する解を選択した。すなわち、本SAWは、2種類の横波成分をバルク波として基板内部にエネルギーを放射しながら表面を伝搬する弾性表面波である。

【0023】このようにして求めた位相速度 $v$ から、x1方向の位相速度 $v_p$ 、電気機械結合係数 $k^2$ 、伝搬損失L、周波数温度係数TCFを求めた。これら位相速度 $v_p$ 、電気機械結合係数 $k^2$ 、伝搬損失L、周波数温度係数TCFを次式に示す。

【0024】

【数7】

$$V_p = \frac{1}{\text{Re}(1/v)}$$

【0025】

【数8】

(5)

$$k^2 = 2 \frac{(v_{po} - v_{ps})}{v_{po}}$$

【0026】

【数9】

$$L = 2\pi \times 8.686 \times \frac{\text{Im}(v)}{\text{Re}(v)} \left[ \text{dB}/\lambda \right]$$

【0027】

【数10】

$$\text{TCF} = \frac{1}{v_p} \frac{\partial v_p}{\partial T} - \alpha$$

ここで、 $v_{po}$ 、 $v_{ps}$ は、それぞれ表面が電氣的開放、電氣的短絡の $x_1$ 方向の位相速度、 $\alpha$ は $x_1$ 方向の熱膨張係数である。シミュレーションは、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角及び伝搬方向を変化させたときの弾性表面波特性を計算することを目的として行なった。任意の切り出し角及び伝搬方向の伝搬特性は、オイラ角( $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$ )で変換された弾性定数、圧電定数、誘電定数に対して計算することにより求められる。また、同一の方向に対して伝搬するバルク波(縦波、速い横波、遅い横波)の位相速度を計算した。

【0028】ここで、オイラ角表示( $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$ )について図31を用いて説明する。図1に示す座標系と同様に、 $X_1$ を弾性表面波の伝搬方向、 $X_2$ を圧電基板表面に含まれる弾性表面波の伝搬方向 $X_1$ に垂直な方向、 $X_3$ を $X_1$ および $X_2$ に垂直な方向とする。 $X_1$ 、 $X_2$ および $X_3$ をそれぞれ結晶軸の $X$ 、 $Y$ および $Z$ (または、 $a$ 、 $b$ 、および $c$ )であるとき、基準のオイラ角( $0^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $0^\circ$ )とする。まず $X_3$ 軸を中心にして弾性表面波の伝搬方向 $X_1$ を $X$ から $Y$ 方向に $\phi$ だけ回転させ、次に回転した $X_1$ 軸を中心にして基板表面に垂直な $X_3$ 軸を $Z$ 軸から反時計方向に $\theta$ だけ回転させる。そして、回転させた $X_3$ 軸を中心としてその基板表面内で伝搬方向 $X_1$ を再度反時計方向に $\phi$ だけ回転して得られる方向(基板の切り出し角(カット面)を含む弾性表面波の伝搬方向)をオイラ角( $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$ )として表す。

【0029】次に、シミュレーション結果について図2乃至図22を用いて説明する。図2乃至図4は、四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、弾性表面波の伝搬方向をオイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ )とし、角度 $\theta$ を変化させた場合の弾性表面波の位相速度 $v_p$ 、電気機械結合係数 $k^2$ 、弾性表面波一波長当たりの伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果である。

【0030】本SAWの位相速度は、図2に示すように、角度 $\theta$ が変化しても常に $5000 \sim 7500 \text{ m/sec}$ と非常に高速であり、バルク波の速い横波よりも速く、縦波の位相速度を越えることはない。また、図3に示すように、本SAWは角度 $\theta$ が $25^\circ \sim 90^\circ$ の広い範囲において発生しており、角度 $\theta$ が $38^\circ \sim 70^\circ$ で

8

は $0.6\%$ 以上、特に角度 $\theta$ が $40^\circ \sim 60^\circ$ では $1\%$ 以上の電気機械結合係数が得られる。さらに、図4に示すように、角度 $\theta$ が約 $55^\circ$ 以下では伝搬損失が小さい。

10

【0031】したがって、本SAWは、角度 $\theta$ が $38^\circ \sim 55^\circ$ の範囲内で電気機械結合係数が大きく、かつ伝搬損失が小さくなる。特に、角度 $\theta$ が $45^\circ \sim 50^\circ$ の範囲では伝搬損失がより小さくなる。これらの範囲では、レイリー波は本SAWに比べ約 $1/2$ の $3000 \sim 4000 \text{ m/sec}$ の速度であるので、リーキー波は存在しない。

20

【0032】図5乃至図7は、弾性表面波の伝搬方向をオイラ角表示で( $15^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ )とし、角度 $\theta$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ 、電気機械結合係数 $k^2$ 、伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果である。また、図8乃至図10は、弾性表面波の伝搬方向をオイラ角表示で( $30^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ )とし、角度 $\theta$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ 、電気機械結合係数 $k^2$ 、伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果である。さらに、図11乃至図13は、弾性表面波の伝搬方向をオイラ角表示で( $45^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ )とし、角度 $\theta$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ 、電気機械結合係数 $k^2$ 、伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果である。

30

【0033】これら図2乃至図13から明らかなように、四ほう酸リチウムの対称性を考慮すると、オイラ角表示( $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$ )の角度 $\phi$ に関係なく、角度 $\theta$ が $30^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内において位相速度の速い本SAWが存在し、角度 $\theta$ が $38^\circ \sim 55^\circ$ の範囲内において、本SAWは、位相速度が速く、電気機械結合係数が大きく、伝搬損失が小さいことがわかる。特に、角度 $\theta$ が $45^\circ \sim 50^\circ$ の範囲においては、本SAWの伝搬損失はさらに小さい。また、本SAWの位相速度は、バルク波の速い横波よりも速く、縦波の位相速度を越えない。

40

【0034】次に、圧電基板の( $011$ )カット面(オイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $\phi$ ))における弾性表面波の伝搬特性をシミュレーション計算した。図14乃至図16は、オイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $\phi$ )とし、角度 $\phi$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ 、電気機械結合係数 $k^2$ 、伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果である。

50

【0035】本SAWの位相速度は、図14に示すように、角度 $\theta$ が変化しても常に $7000 \sim 7500 \text{ m/sec}$ と非常に高速である。また、図15に示すように、本SAWは、角度 $\phi$ が $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲において存

9

在し、角度 $\phi$ が $80^\circ \sim 90^\circ$ の範囲において高い電気機械結合係数が得られる。さらに、図16に示すように、本SAWの伝搬損失は、角度 $\phi$ が $88^\circ \sim 90^\circ$ において非常に低くなる。したがって、本SAWは、角度 $\phi$ が $90^\circ$ のとき、電気機械結合係数が最大となり、伝搬損失が最小となる。

【0036】次に、弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ )である場合の弾性表面波の伝搬特性をシミュレーション計算した。図17乃至図20は、電極材料をアルミニウムを主成分とする金属材料とし、電極の膜厚を変化させた場合の位相速度 $v_p$ 、電気機械結合係数 $k^2$ 、伝搬損失 $L$ 、周波数温度係数TCFの計算結果を示している。このシミュレーション計算において、電気的開放とは、金属膜と基板との界面で $x_3$ 方向の電束密度が零であること [ $x_3 = 0$ において、 $D_3 = 0$ ]を意味し、電気的短絡とは、金属膜の電位が零であること [ $x_3 = 0$ において、 $\Phi = 0$ ]を意味しているとして計算した。

【0037】電極の膜厚 $h$ を弾性表面波の波長 $\lambda$ で規格化した規格化膜厚 $h/\lambda$ を0.0%から6.0%に変化させると、図17に示すように、位相速度は徐々に低下し、図18に示すように、電気機械結合係数は1.2%から3.1%に増大する。また、規格化膜厚 $h/\lambda$ が0.0%から6.0%の範囲では、図19に示すように、伝搬損失は0.01dB/ $\lambda$ 以下と非常に低いことがわかる。さらに、周波数温度係数は、図20に示すように、規格化膜厚 $h/\lambda$ が0.0%から5.0%の範囲では、約20ppm/ $^\circ\text{C}$ 以下の優れた温度特性が得られる。

【0038】次に、本SAWの性質を確認するために、基板の深さ方向の変位及び電位分布について計算した。図21及び図22は、弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ )の場合、電極(アルミニウム)の規格化膜厚が3%のときのシミュレーション結果である。図21は電気的開放の場合の計算結果であり、図22は電気的短絡の場合の計算結果である。図21及び図22において、横軸は変位 $U_1$ ( $x_1$ 方向の変位)、変位 $U_3$ ( $x_3$ 方向の変位)、静電電位 $\Phi$ の相対振幅値であり、縦軸は波長で規格化した基板表面からの規格化深さである。

【0039】図21、図22から明らかなように、弾性表面波の変位、静電電位は基板表面付近に集中しており、縦波成分が支配的である。このように、第1の本発明によれば、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角及び弾性表面波の伝搬方向をオイラ角表示で( $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $30^\circ \sim 90^\circ$ 、 $40^\circ \sim 90^\circ$ )およびそれと等価な範囲内としたので、伝搬速度がレイリー波およびリーキー波よりも速い高速な弾性表面波を利用した弾性表面波装置を実現することができる。

【0040】また、第2の本発明によれば、四ほう酸リ

(6)

10

チウム単結晶基板の切り出し角および弾性表面波の伝搬方向をオイラ角表示で( $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $38^\circ \sim 55^\circ$ 、 $80^\circ \sim 90^\circ$ )およびそれと等価な範囲内としたので、伝搬速度が速く、かつ、電気機械結合係数が十分な弾性表面波を利用した弾性表面波装置を実現することができる。

【0041】さらに、この範囲を( $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $45^\circ \sim 50^\circ$ 、 $80^\circ \sim 90^\circ$ )およびそれと等価な範囲とすれば、伝搬損失が充分低く、伝搬速度が速く、かつ、電気機械結合係数が十分な弾性表面波を利用した弾性表面波装置を実現することができる。さらにまた、弾性表面波装置の電極がアルミニウムを主成分とする金属から構成され、電極の規格化膜厚を約5%以下にすれば、電気機械結合係数がより大きな弾性表面波を利用でき、温度特性に優れた弾性表面波装置を実現することができる。

【0042】なお、四ほう酸リチウム単結晶は点群4mmの対称性を有し、弾性表面波の特性も所定の対称性を有するので、上記オイラ角で示した方向は( $0^\circ \sim 360^\circ$ 、 $38^\circ \sim 55^\circ$ 、 $80^\circ \sim 100^\circ$ )などの等価の方向も含むものである。

【0043】

【実施例】本発明の一実施例による弾性表面波装置を図23乃至図28を用いて説明する。本実施例による弾性表面波装置を図23に示す。本実施例の弾性表面波装置はトランスバーサルフィルタであり、主面が(011)面である四ほう酸リチウム単結晶からなる圧電基板21の表面に、電極線幅 $\lambda/8$ のダブルインタディジタル電極からなる入力櫛形電極22と出力櫛形電極23が形成され、これら入力櫛形電極22と出力櫛形電極23間の伝搬領域に金属膜24が形成されている。

【0044】入力櫛形電極22、出力櫛形電極23は、それぞれ、20対、周期 $8\mu\text{m}$ (電極線幅 $1\mu\text{m}$ )、開口長 $400\mu\text{m}$ であり、弾性表面波の伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ )となるような向きに形成されている。入力櫛形電極22、出力櫛形電極23、金属膜24は、同じ厚さのアルミニウム膜により形成されている。

【0045】弾性表面波の伝搬速度は、通過周波数特性のピークの周波数より測定し、弾性表面波の電気機械結合係数は、櫛形電極の放射アドミッタンスより測定し、弾性表面波の伝搬損失は、伝搬路長を $100\lambda$ ( $\lambda$ は弾性表面波の波長)、 $200\lambda$ 、 $300\lambda$ と変えた場合の挿入損失の変化より測定し、弾性表面波の周波数温度係数TCFは、通過周波数特性の位相の温度変化より測定した。

【0046】図24は、アルミニウム膜の膜厚が $177\text{nm}$ (規格化膜厚として2.2%)、伝搬路の長さが $800\mu\text{m}$ の場合の通過周波数特性の測定結果である。図24から明らかなように、周波数 $832\text{MHz}$ の位置

11

に、本SAWに対応したピークが現れている。この本SAWの挿入損失は13.7dBと小さく、伝搬速度は6656m/secと非常に高速である。

【0047】また、周波数400MHzの位置に、レイリー波に対応したピークが現れている。このレイリー波の挿入損失は24.1dBで、伝搬速度は3204m/secである。本SAW及びレイリー波とも、実験と計算は良く一致している。アルミニウム膜の膜厚を変化させた場合の伝搬速度、電気機械結合係数、伝搬損失、周波数温度係数の測定結果(●により示す)を計算結果とともに図25、図26、図27、図28にそれぞれ示す。

【0048】図25乃至図28から明らかなように、実験結果は計算結果と良く一致しており、高周波用の弾性表面波装置として良好な伝搬特性が得られた。例えば、アルミニウム膜の規格化膜厚が2%のとき、伝搬速度は6650m/sec程度、電気機械結合係数は2.8%程度、伝搬損失は0.016dB/λ程度、TCFは+30ppm/℃程度の伝搬特性が得られる。

【0049】次に、本発明の他の実施例による弾性表面波装置について図29を用いて説明する。本実施例の弾性表面波装置は、図23に示す弾性表面波装置と同様に、四ほう酸リチウム単結晶からなる圧電基板21の表面に、入力楕形電極22と出力楕形電極23が形成され、これら入力楕形電極22と出力楕形電極23間の伝搬領域に金属膜24が形成されている。圧電基板21の切り出し角度および弾性表面波の伝搬方向はオイラ角表示で(45°、40°、90°)であり、他の構成は前述の実施例と同様に作製した。

【0050】図29は、アルミニウム膜の膜厚が245nm(規格化膜厚として2.2%)、伝搬路の長さが800μmの場合の通過周波数特性の測定結果である。図29から明らかなように、周波数883MHzの位置に、本SAWに対応したピークが現れている。この本SAWの挿入損失は38.5dBと小さく、伝搬速度は7070m/secと非常に高速であり、電気機械結合係数は1.6%である。

【0051】また、周波数389MHzの位置にレイリー波に対応したピークが現れている。このレイリー波の挿入損失は25.6dBで、伝搬速度は3110m/secである。本SAW及びレイリー波とも、実験結果は計算結果に良く一致している。本発明は上記実施例に限らず種々の変形が可能である。

【0052】上記実施例では、圧電基板21の表面に入力楕形電極22、出力楕形電極23を図30(a)に示すように、弾性表面波装置の圧電基板21表面に楕形電極22、23の電極指25を直接形成しているが、図30に示すように種々の断面構造が可能である。例えば、図30(b)に示すように、電極指25の間をSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などの絶縁層26で埋めてもよい。ま

12

た、図30(c)に示すように、電極指25全体をSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などの絶縁層27で埋めてもよい。また、図30(d)に示すように、圧電基板21上に形成された絶縁層27上に電極指25を形成してもよい。また、図30(e)に示すように、圧電基板21表面を掘って溝を形成し、その溝の中に電極指25を埋めてもよい。なお、図30(c)及び(d)における電極の膜厚hは、電極指25と絶縁層27の厚さを加えた厚さとみなされる。

【0053】また、弾性表面波装置の楕形電極を構成する金属は、アルミニウムを主成分とする金属材料の他に、金を主成分とする金属材料を用いることもできる。これら金属材料にシリコン、銅などを添加してもよい。また、チタン層、タングステン層などと組合せて多層構造の電極としてもよい。さらに、上記実施例の弾性表面波装置は伝搬路上に金属膜を設けたトランスバースルフィルタであったが、伝搬路上に金属膜を設けなくてもよい。

【0054】また、上記実施例の弾性表面波装置とは異なる構造でもよい。例えば、一對のグレーティング反射器の間に楕形電極を設けた共振型フィルタや、共振子にも本発明を適用できる。また、多数の楕形電極を並列に接続した構造(IIDT構造)の弾性表面波装置にも本発明を適用することもできる。

【0055】

【発明の効果】以上説明したように、第1の本発明によれば、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角及び弾性表面波の伝搬方向をオイラ角表示で(0°~45°、30°~90°、40°~90°)およびそれと等価な範囲内としたので、伝搬速度がレイリー波およびリーキー波よりも速い高速な弾性表面波を利用した弾性表面波装置を実現することができる。

【0056】また、第2の本発明によれば、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および弾性表面波の伝搬方向をオイラ角表示で(0°~45°、38°~55°、80°~90°)およびそれと等価な範囲内としたので、伝搬速度が速く、かつ、電気機械結合係数が十分な弾性表面波を利用した弾性表面波装置を実現することができる。

【0057】さらに、この範囲を(0°~45°、45°~50°、80°~90°)およびそれと等価な範囲とすれば、伝搬損失が充分低く、伝搬速度が速く、かつ、電気機械結合係数が十分な弾性表面波を利用した弾性表面波装置を実現することができる。さらにまた、弾性表面波装置の電極がアルミニウムを主成分とする金属から構成され、電極の規格化膜厚を約5%以下にすれば、電気機械結合係数がより大きな弾性表面波を利用でき、温度特性に優れた弾性表面波装置を実現することができる。

【0058】したがって、本発明によれば、伝搬速度が

13

速く、十分な電気機械結合係数が得られ、伝搬損失の低く、かつ、温度特性にも優れた弾性表面波を用いた装置を実現できるから、更なる高周波動作の要求に十分対応することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】弾性表面波のシミュレーションに用いる座標系と境界条件を示した図である。

【図2】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $0^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図3】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $0^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の電気機械結合係数 $k^2$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図4】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $0^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図5】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $15^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図6】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $15^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の電気機械結合係数 $k^2$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図7】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $15^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図8】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $30^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図9】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウ

(8)

14

ムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $30^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の電気機械結合係数 $k^2$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図10】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $30^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図11】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $45^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図12】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $45^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の電気機械結合係数 $k^2$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図13】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向（ $45^\circ$ 、 $\theta$ 、 $90^\circ$ ）の角度 $\theta$ を変化させた場合の伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図14】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の（011）カット面上で、伝搬方向 $\phi$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図15】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の（011）カット面上で、伝搬方向 $\phi$ を変化させた場合の電気機械結合係数 $k^2$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図16】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の（011）カット面上で、伝搬方向 $\phi$ を変化させた場合の伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図17】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向をオイラ角（ $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ ）とし、電極の規格化膜厚 $h/\lambda$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ のシミュレーション結果を示すグラフである。



15

【図18】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向をオイラ角( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ )とし、電極の規格化膜厚 $h/\lambda$ を変化させた場合の電気機械結合係数 $k^2$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図19】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向をオイラ角( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ )とし、電極の規格化膜厚 $h/\lambda$ を変化させた場合の伝搬損失 $L$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図20】四ほう酸リチウム単結晶基板表面にアルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、四ほう酸リチウム単結晶基板の切り出し角および伝搬方向をオイラ角( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ )とし、電極の規格化膜厚 $h/\lambda$ を変化させた場合の周波数温度係数TCFのシミュレーション結果を示すグラフである。

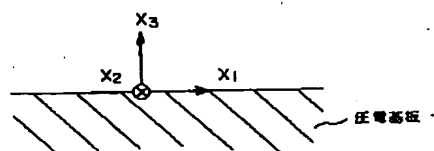
【図21】四ほう酸リチウム単結晶基板表面に弾性表面波の伝搬方向が( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ )になるように、アルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、基板表面が電気的開放の場合の基板の深さ方向の変位分布 $U_1$ 、 $U_3$ 、電位分布 $\Phi$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図22】四ほう酸リチウム単結晶基板表面に弾性表面波の伝搬方向が( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ )になるように、アルミニウムを主成分とする電極が形成された弾性表面波装置において、基板表面が電気的短絡の場合の基板の深さ方向の変位分布 $U_1$ 、 $U_3$ 、電位分布 $\Phi$ のシミュレーション結果を示すグラフである。

【図23】本発明の一実施例による弾性表面波装置を示す図である。

【図24】本発明の一実施例による弾性表面波装置(切り出し角および伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ ))の通過周波数特性を示すグラフで

【図1】



(9)

16

ある。

【図25】本発明の一実施例による弾性表面波装置(切り出し角および伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ ))において、電極の規格化膜厚 $h/\lambda$ を変化させた場合の位相速度 $v_p$ の測定結果とシミュレーション結果とを示すグラフである。

【図26】本発明の一実施例による弾性表面波装置(切り出し角および伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ ))において、電極の規格化膜厚 $h/\lambda$ を変化させた場合の電気機械結合係数 $k^2$ の測定結果とシミュレーション結果とを示すグラフである。

【図27】本発明の一実施例による弾性表面波装置(切り出し角および伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ ))において、電極の規格化膜厚 $h/\lambda$ を変化させた場合の伝搬損失 $L$ の測定結果とシミュレーション結果とを示すグラフである。

【図28】本発明の一実施例による弾性表面波装置(切り出し角および伝搬方向がオイラ角表示で( $0^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $90^\circ$ ))において、電極の規格化膜厚 $h/\lambda$ を変化させた場合の周波数温度係数TCFの測定結果とシミュレーション結果とを示すグラフである。

【図29】本発明の他の実施例による弾性表面波装置(切り出し角および伝搬方向がオイラ角表示で( $45^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $90^\circ$ ))の通過周波数特性を示すグラフである。

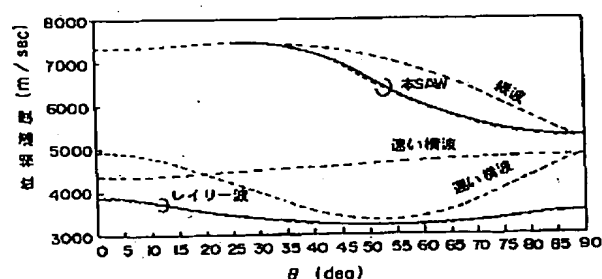
【図30】本発明の弾性表面波装置の櫛型電極の種々の断面構造を示す図である。

【図31】オイラ角表示を説明するための図である。

【符号の説明】

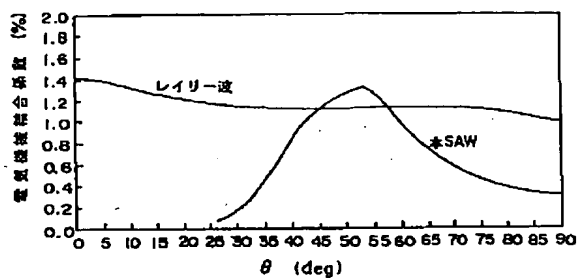
- 21…圧電基板
- 22…入力櫛型電極
- 23…出力櫛型電極
- 24…金属膜
- 25…電極指
- 26…絶縁層
- 27…絶縁層

【図2】

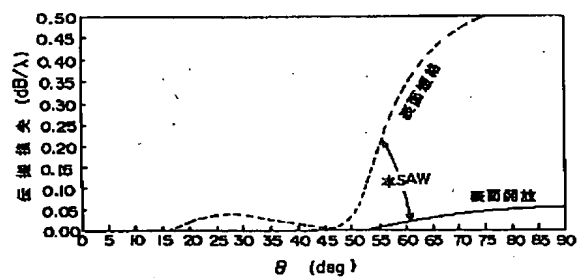


(10)

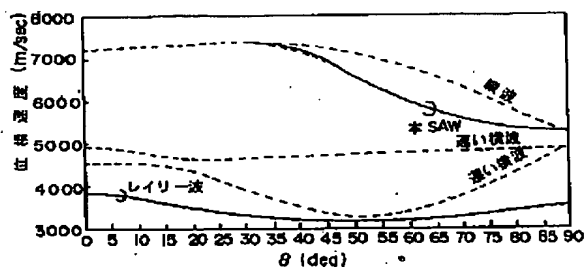
【図3】



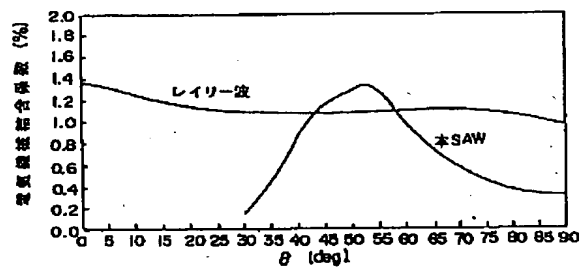
【図4】



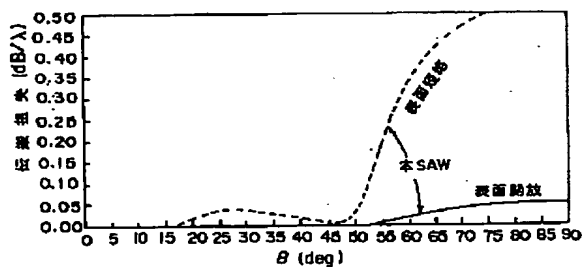
【図5】



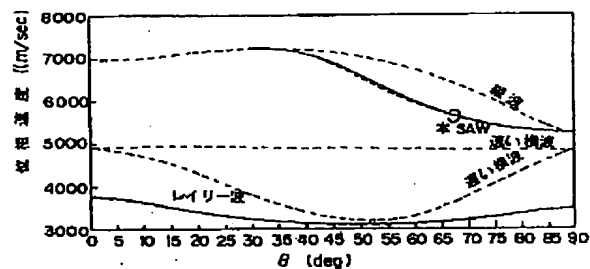
【図6】



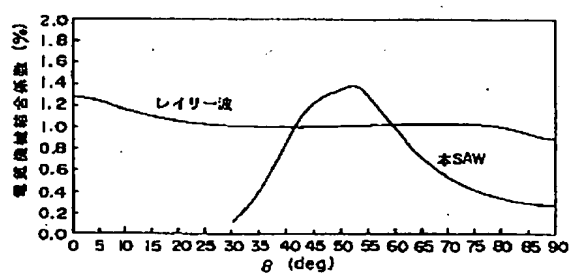
【図7】



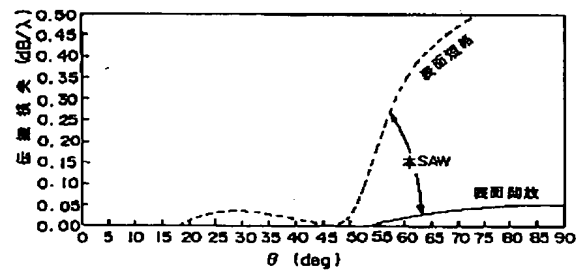
【図8】



【図9】

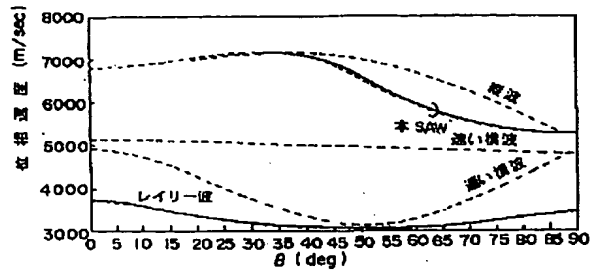


【図10】

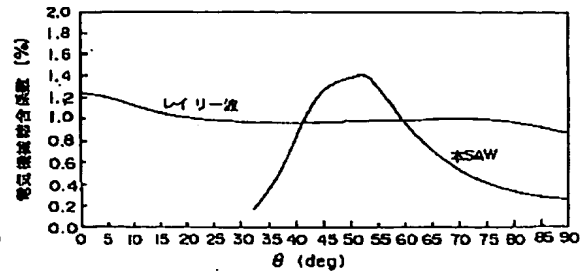


(11)

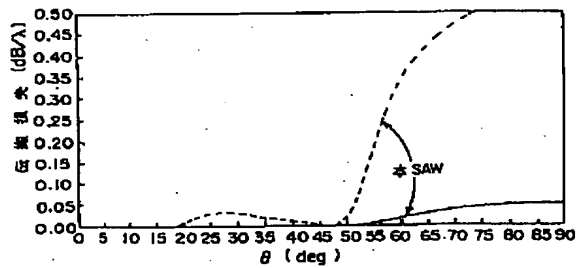
【図11】



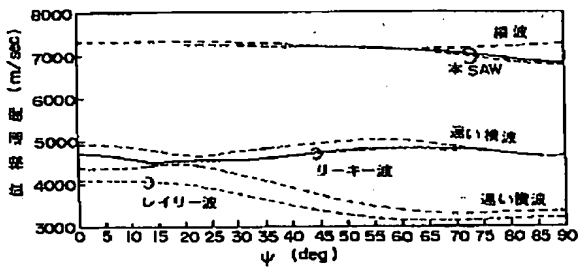
【図12】



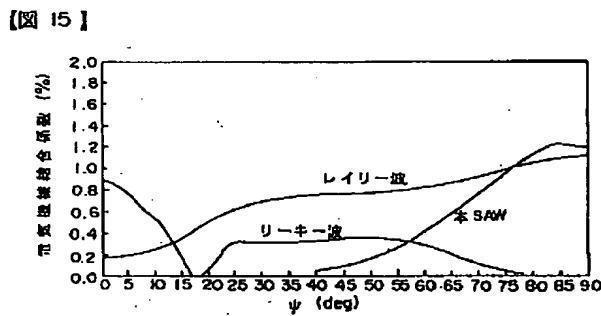
【図13】



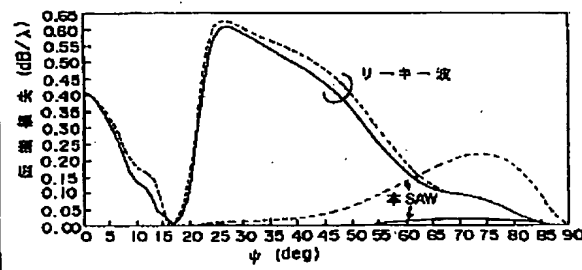
【図14】



【図15】

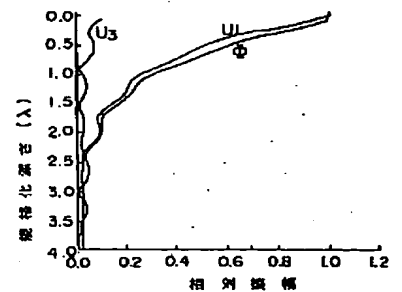


【図16】

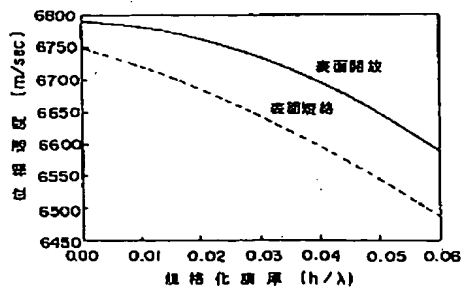


【図15】

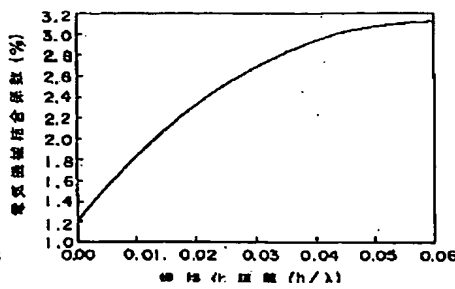
【図21】



【図17】

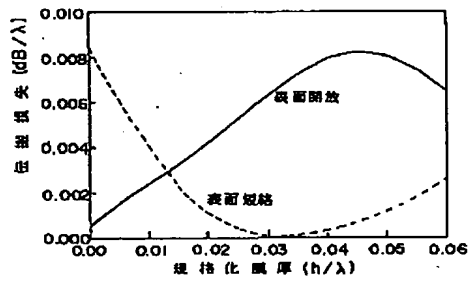


【図18】

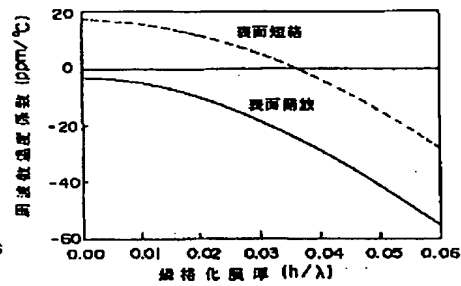


(12)

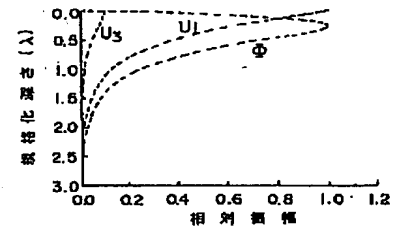
【図19】



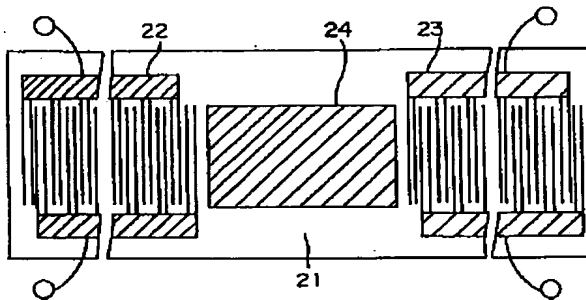
【図20】



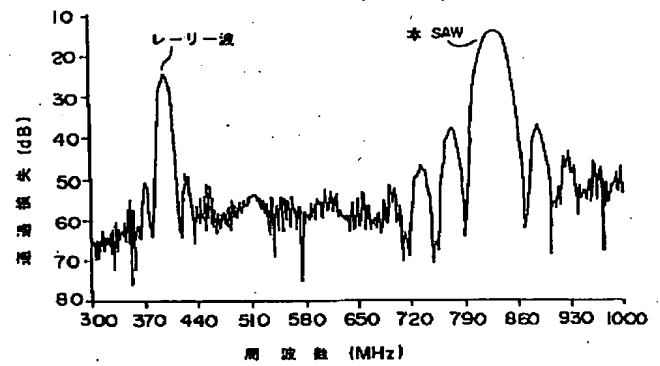
【図22】



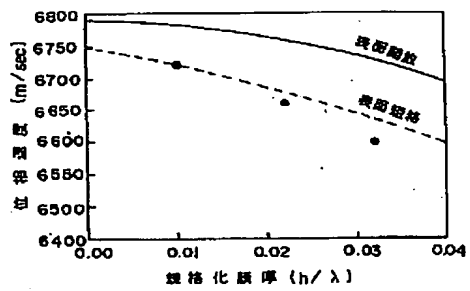
【図23】



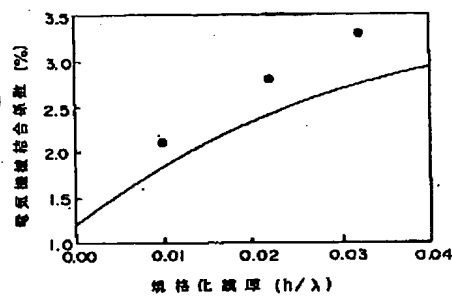
【図24】



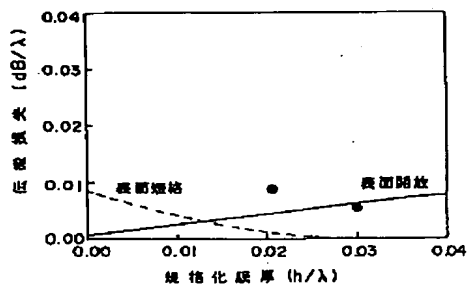
【図25】



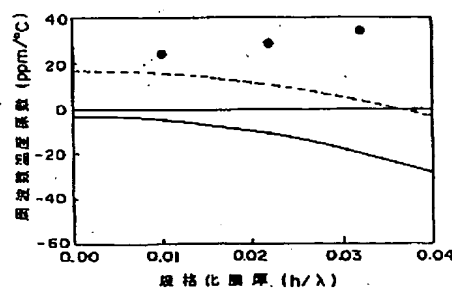
【図26】



【図27】

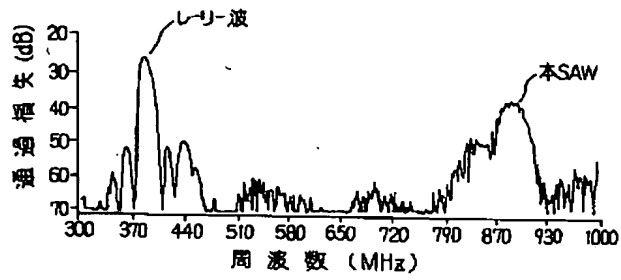


【図28】

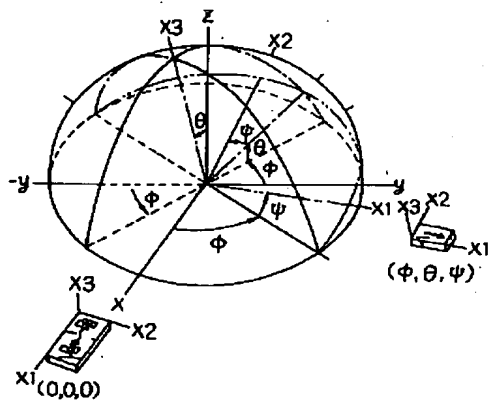


(13)

【図29】



【図31】



【図30】

